

Simulación y Ensayo de Contenedores de Baterías para Vehículos Eléctricos bajo Solicitaciones de Choque

L. Martínez Sáez¹, J. Rivera Hoyos², M. Espantaleón Ruiz³, A. García Álvarez⁴

¹INSIA, Universidad Politécnica de Madrid. luis.martinez@upm.es

²INSIA, Universidad Politécnica de Madrid. javier.rivera@upm.es

³INSIA, Universidad Politécnica de Madrid. manuel.espantaleon@upm.es

⁴INSIA, Universidad Politécnica de Madrid. a.garcia@upm.es

Actualmente, la reducción de peso en los vehículos es un objetivo prioritario por diversos factores, entre los que destaca la creciente preocupación por el deterioro del medio ambiente, la reducción de la demanda energética o reducir el impacto medioambiental. Este hecho es de especial importancia en los vehículos híbridos y eléctricos dada la necesidad de incorporar acumuladores de energía eléctrica o baterías, los cuales aportan una masa adicional de consideración en el vehículo. En este contexto, el uso de materiales plásticos como elementos estructurales supone un reto tecnológico.

El presente artículo está enfocado en el desarrollo de un contenedor de baterías para un vehículo eléctrico de la categoría N2 (vehículos destinados al transporte de mercancías de más de 3,5t y menos de 12t) en material termoplástico que sea capaz de soportar las sollicitaciones de choque. El contenedor de baterías en este tipo de vehículos es muy pesado, cuenta con grandes dimensiones y está unido al chasis del vehículo, es decir, debe soportar unos requisitos estructurales importantes. Estas características dificultan el diseño de este tipo de contenedores en material plástico. Por el contrario, en el caso de turismos con propulsión híbrida, los contenedores tienen unos tamaños mucho más reducidos (al tener menores energía acumulada) y las labores de protección ante choque las realiza la propia estructura del vehículo.

El desarrollo del contenedor de baterías se apoya en modelos de elementos finitos representando las cargas dinámicas de los choques en cinco direcciones (dos longitudinales, dos transversales y una vertical). Se han tenido en cuenta factores de influencia de la temperatura (que afecta a las propiedades mecánicas de los materiales plásticos), así como de la velocidad de deformación. Finalmente, una vez obtenido un diseño capaz de cumplir con las especificaciones, se han realizado ensayos de validación a escala real con prototipos físicos del contenedor. Las actividades descritas en este artículo se han desarrollado dentro del proyecto europeo OPERA4FEV.

1. Introducción

La industria de los vehículos híbridos y eléctricos está teniendo gran relevancia en la actualidad, dentro del debate mundial sobre la movilidad humana sostenible y ambientalmente amigable. Por esta razón, se hace necesaria la investigación y el desarrollo de nuevos componentes en aras de conseguir el objetivo planteado de forma que mejoren el rendimiento y, por consiguiente, la autonomía de este tipo de vehículos [1]. El proyecto europeo, del 7º Programa Marco de la UE, OPERA4FEV (*OPERating RACK For Full-Electric Vehicle*) tiene como objetivo el desarrollo de un contenedor de baterías en un material termoplástico con premisas de “eco-diseño” [2], destinado a ser instalado en un vehículo industrial de la categoría N2 (vehículo destinado al transporte de mercancías con una masa superior a las 3,5t e inferior a las 12t), como el mostrado en la figura 1.

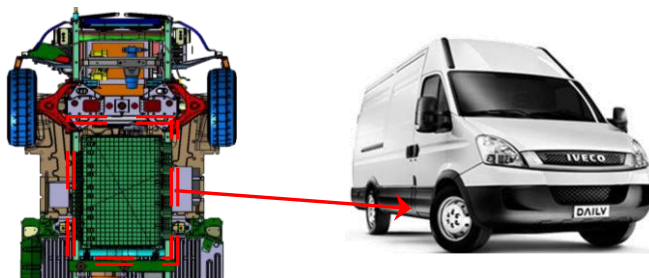


Figura 1: Instalación del contenedor de baterías en la parte inferior del vehículo de categoría N2.

Dentro de los requisitos de diseño, las condiciones de seguridad imponen grandes restricciones puesto que es necesario evaluar las prestaciones dinámicas del contenedor en el caso de producirse un choque. Además es necesario analizar el riesgo potencial para el vehículo y sus ocupantes en el caso de producirse algún fallo (rotura, explosión) en una o más baterías, proporcionando contramedidas para controlar las consecuencias de estos fallos. Además, se han definido los requisitos que el material plástico debe cumplir con base a diferentes requisitos: reciclabilidad, coste, propiedades ignífugas, propiedades mecánicas, resistencia a abrasivos, etc. Finalmente, el material utilizado para el contenedor de baterías es un polipropileno reforzado con un 30% de fibra de vidrio (PP1515G30V0), al cual se le han añadido un alto grado de aditivos para mejorar la capacidad ignífuga del producto final. El objetivo con el uso de materiales plásticos es conseguir una reducción cercana al 25% en el peso respecto a soluciones tradicionales, manteniendo el resto de prestaciones (en especial la seguridad frente al choque del vehículo). La figura 2 muestra los componentes principales del contenedor de baterías que está constituido por dos carcasa en cuyo interior se almacenan las baterías de litio-ion almacenadas en 8 módulos de 12 baterías cada uno. Además, el contenedor de baterías incluye todos los elementos para la refrigeración de los componentes, la gestión de la electrónica, elementos de seguridad eléctrica, etc. El uso de este tipo de material, buscando la disminución de peso en componentes con un alto compromiso estructural en situaciones de choque, representa un gran reto tecnológico en ingeniería [3].

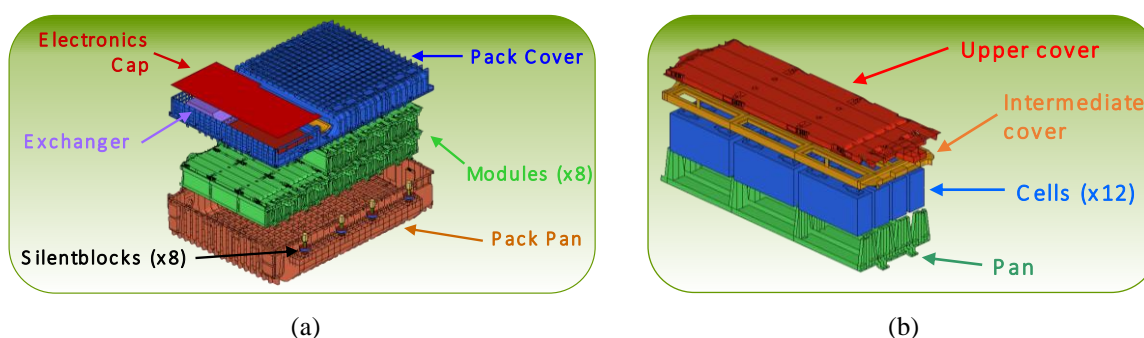


Figura 2: Contenedor de baterías para un vehículo de categoría N2 con sus componentes internos (a) y sub-ensamble de uno de los ocho módulos de baterías (b).

2. Métodos

Se ha desarrollado una metodología integral [4] para la evaluación, el desarrollo y validación del contenedor de baterías. Esta metodología se apoya en el uso de herramientas CAE sometiendo al contenedor de baterías a simulaciones virtuales de choque. Dentro de los requisitos establecidos, el diseño final debe ser capaz de conservar su integridad (permanecer fijado al vehículo) y no presentar roturas en la superficie externa, manteniendo confinados los componentes internos en caso de choque. Posteriormente, se fabricaron los prototipos reales para la validación mediante ensayos físicos de contraste.

2.1. Simulación en elementos finitos.

Para la realización de la simulación en elementos finitos, es necesario incorporar un modelo con geometría tridimensional. Para ello se han tomado modelos desarrollados en CAD con el diseño original (basado en la experiencia del fabricante). Este modelo original posteriormente será modificado para incrementar sus prestaciones ante el choque. Se han utilizado herramientas específicas para realizar las fases de mallado, pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. La primera fase tiene como objetivo generar un modelo con características geométricas equivalentes a las del modelo de partida, identificando cada una las diferentes superficies de cada una de las piezas que conforman el contenedor (ver mallado del diseño final obtenido).

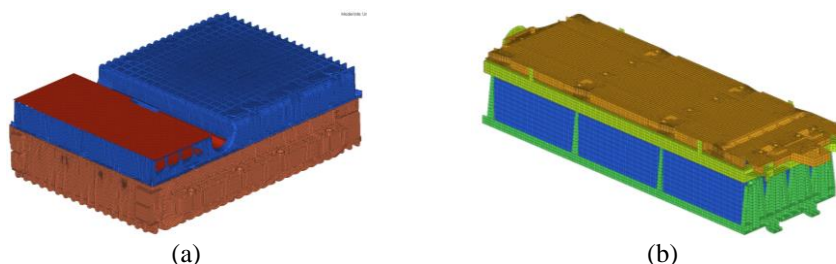


Figura 3: Mallado de los diferentes componentes. (a) Carcassas exteriores. (b) Módulo de baterías.

Para el mallado se eligen elementos del tipo shell (2D), con un tamaño mínimo de 1 mm (la decisión del tamaño mínimo de elementos es una decisión de compromiso entre la precisión geométrica, calidad de la malla y coste computacional), con los que se conforman las superficies en el modelo de elementos finitos. Para la representación de los componentes de fijación (como tornillos), son utilizados elementos tipo BEAM o RBODY (1D). Además, es necesario asignar correctamente las propiedades de los materiales y espesores de cada una de las piezas. Para la caracterización del material termoplástico (material del que dependen las prestaciones dinámicas del contenedor de baterías), se han realizado ensayos de tracción sobre probetas normalizadas del polímero de acuerdo a las prescripciones definidas en la norma UNE-EN ISO 527-2. Además, se han diseñado ensayos para tener en cuenta el cambio de las propiedades mecánicas en función de la temperatura (al ser un material plástico) y de la velocidad de deformación (al tratarse de un choque), para ello se han realizado ensayos sometiendo a las probetas a tres velocidades y tres temperaturas diferentes, como se muestra en la tabla 1. Para representar el comportamiento mecánico del material plástico (PP1515G30V0) se utilizó la formulación del modelo de material de Johnson-Cook. Se seleccionó esta formulación matemática debido a que tiene en cuenta los fenómenos de endurecimiento por deformación e influencia de la velocidad de deformación.

Tabla 1: Condiciones del ensayo de tracción para el material PP1515G30V0.

TEMPERATURA DEL ENSAYO.	VELOCIDADES DE ENSAYO.		
(°C)	(mm/ms)		
-20	0,1	1,2	8,3
+20	0,1	1,2	8,3
+60	0,1	1,2	8,3

Las condiciones dinámicas del choque se han tomado de la reglamentación vigente, el Reglamento 100 de las Naciones Unidas en su anexo 8C [5]. Las prescripciones señaladas en el R100, establecen un corredor de aceleraciones, delimitado por un perfil máximo y uno mínimo en función de la categoría a la que pertenece el vehículo. Este reglamento define las condiciones dinámicas para los impactos longitudinales y laterales y sus condiciones se han incorporado en los modelos de simulación, tomándose un perfil promedio tal y como se muestra en la figura 4 (a-b). Adicionalmente, como requisito de desarrollo del contenedor de baterías, se han comprobado sus prestaciones ante sollicitación vertical, para ello se ha seguido el perfil de carga descrito en las recomendaciones del documento de trabajo de la UNECE St/SG/AC.10/C.3/2010/72 [6].

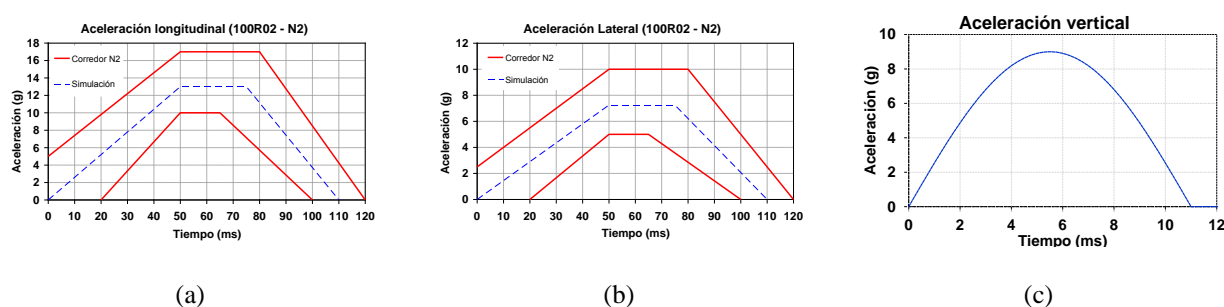


Figura 4: Perfiles de aceleración para pruebas virtuales, según prescripciones del Reglamento 100, para ensayos en dirección longitudinal (a), lateral (b) y vertical (c).

2.2. Ensayos de choque en laboratorio.

Una vez finalizado el diseño, se fabricaron prototipos físicos a escala real para realizar las pruebas de validación. Se han diseñado los ensayos de choque en el laboratorio en dos fases: en la primera fase con contenedores de baterías no funcionales (donde sus componentes internos tales como baterías, elementos de refrigeración y componentes electrónicos, fueron reemplazados con lastres de aluminio y acero, tratando de emular la masa y el volumen de los componentes originales – figura 5), y una segunda fase con contenedores de baterías completamente funcionales (figura 6). El objetivo de la primera fase es realizar una validación de los elementos estructurales sin necesidad de incorporar elementos activos que puedan aumentar la peligrosidad de la prueba (en caso de fallo, pudiéndose producir explosiones). Una vez que se han verificado estructuralmente los elementos, se realizan los ensayos de la segunda fase con contenedores funcionales. La primera fase de validación cobra un

gran interés puesto que solamente se dispone de un único set de baterías y material eléctrico (por el elevado coste de los mismos), por lo tanto para la realización de los ensayos de la segunda fase ha sido necesario desmontar, sustituir los componentes mecánicos (en plástico) y volver a montar para ensayar en otra configuración. El objetivo de la segunda fase es una verificación integral del contenedor de baterías, donde no sólo se prueba la resistencia estructural sino que se verifica la estabilidad de los componentes eléctricos y si el contenedor continúa siendo funcional después del choque.

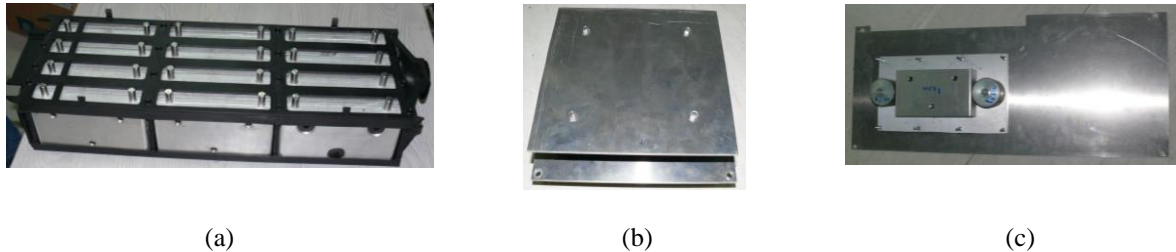


Figura 5: Ensamble del contenedor de baterías con lastres de reemplazo de las piezas originales. Módulo de baterías (a), intercambiador de calor (b) y componentes electrónicos y de control (c).

Finalizado cada uno de ensayos, se realizó una inspección visual del conjunto del contenedor en busca de fisuras en los componentes externos (carcasa). Además, en los ensayos de la segunda fase (con contenedor de baterías funcional) se monitorizó el estado eléctrico del contenedor, así como de cada uno de los módulos de forma individual. Posteriormente se procedió al desmontaje de cada una de las piezas, determinando los daños producidos en la prueba de deceleración.



Figura 6: Contenedor de baterías con sus componentes originales. Montaje del cableado y de los módulos de baterías de ion-Litio (a) y ensamble de la cubierta superior junto al sistema de refrigeración y control (b).

Los ensayos físicos de laboratorio se realizaron igualmente en las cinco direcciones diferentes de aplicación de la carga: dos en situación de carga longitudinal (trasero y frontal), dos en dirección transversal (lateral derecho e izquierdo) y uno final para representar el caso de choque vertical.

3. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas durante el proceso de diseño y optimización de los elementos constituyentes del contenedor de baterías. Además, se muestran los resultados de los ensayos de laboratorio realizados con los con prototipos físicos.

3.1. Resultados ensayos virtuales.

Durante la fase de diseño, y debido a las grandes restricciones del diseño (tipo de material, dirección de desmolde, espesores, requisitos de refrigeración...) se han realizado más de doscientos (200) ensayos virtuales encaminados a la consecución de un diseño optimizado del contenedor capaz de soportar los esfuerzos generados sobre los componentes de plástico, sin presentar roturas externas en la carcasa [7]. Como se observa en la figura 7, en el modelo inicial del contenedor (realizado por el fabricante y basado en la experiencia) se producían grandes roturas sobre los soportes laterales cuando este fue sometido a cargas transversales. Este tipo de roturas, junto con los requisitos de diseños, no eran compatibles por lo que se tuvo que rediseñar completamente el sistema de unión a la estructura del vehículo. De este modo, se pasó de tener seis puntos de anclaje con soportes

independientes, a una solución de anclaje (con ocho puntos de fijación al chasis) de forma continua (figura 8) que mejorara la resistencia mecánica ante choques de impacto lateral.

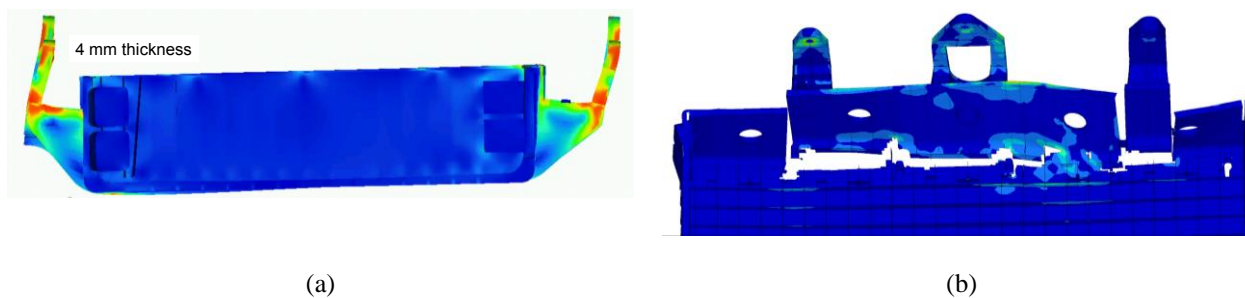


Figura 7: Resultados ensayos virtuales del modelo original (deformaciones y roturas).

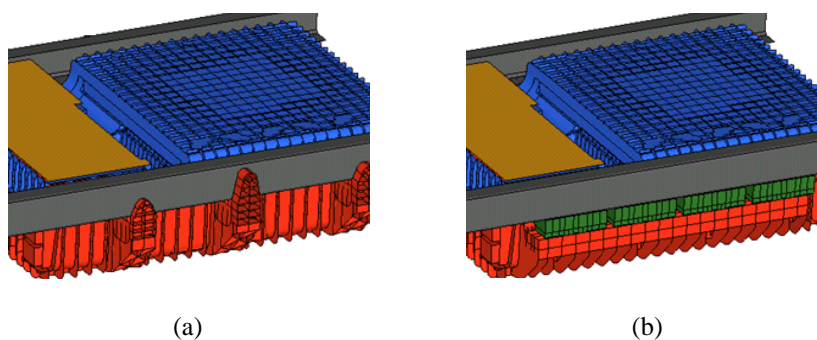


Figura 8: Evolución del diseño de los soportes laterales del contenedor de baterías. Diseño inicial (a) y diseño de un soporte continuo con cuñas laterales (b).

Una vez que se mejoró significativamente el comportamiento general en los soportes (las roturas producidas necesitaban de un cambio drástico en el diseño), aún se producían roturas en la superficie exterior de las carcasas. Estas roturas se ocasionaban por el movimiento interior de los elementos constitutivos del contenedor de baterías, como por ejemplo los módulos. Por ello se diseñaron diferentes elementos de seguridad de forma que se combinaran zonas de alta rigidez, áreas de absorción de energía, zonas de interacción de diferentes elementos, etc. De este modo, se consigue gestionar de forma eficiente los caminos de carga en cada una de las direcciones de impacto, evitando que se produzcan roturas en la superficie exterior del contenedor.

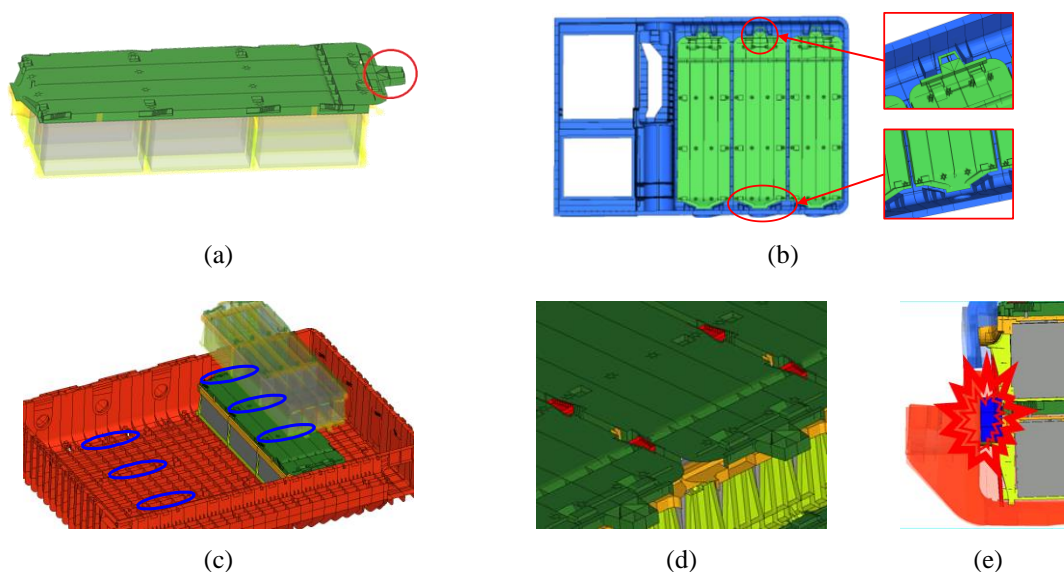


Figura 9: Modificaciones de los componentes internos del contenedor de baterías para mejorar la disipación de la energía.

En la figura 9 se muestran los elementos de seguridad más relevantes incorporados en la zona interior. Entre estos sistemas se encuentran la adición de superficies salientes (9a); resaltes para restringir los movimientos laterales de los módulos de las baterías superiores (9b); uniones macho-hembra para incrementar la interacción entre dos piezas (9c); elementos en forma de cuña para limitar el movimiento relativo entre los módulos para los impactos longitudinales (9d); dispositivos de choque para modificar el camino de carga en los impactos laterales disminuyendo las cargas de la carcasa superior, redirigiéndolas a la inferior (9e).

Finalmente y para aumentar la durabilidad del contenedor de baterías, se incorporó en el diseño un sistema que redujera el efecto de la transmisión de las vibraciones del vehículo al contenedor, a través de un sistema de doble “silent block” en cada uno de los apoyos (figura 10). Finalmente, se congeló el diseño para poder realizar los moldes para la fabricación física de prototipos con el cumplimiento de todos los requisitos de choque impuestos inicialmente. El modelo final en elementos finitos del contenedor de baterías, está compuesto más de seiscientos mil (600.000) nodos y elementos.

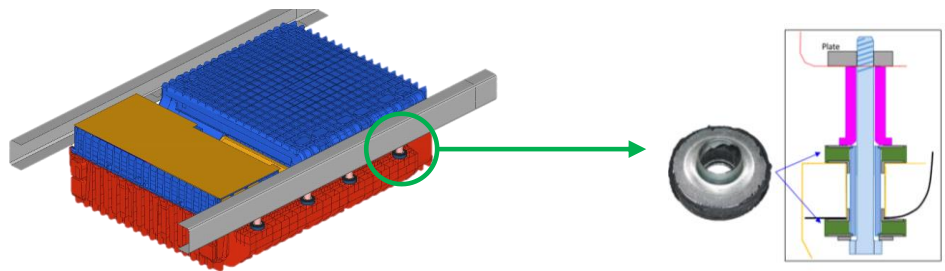


Figura 10: Diseño final del contenedor de baterías con el sistema de amortiguación de vibraciones.

El desarrollo de los modelos se ha efectuado con las propiedades de material a $+60^{\circ}\text{C}$, al ser la condición más desfavorable en cuanto a la resistencia mecánica (con una reducción del 40% de resistencia máxima y una reducción del 50% en absorción de energía respecto del material a $+20^{\circ}\text{C}$). Sin embargo, los ensayos reales no pueden realizarse a $+60^{\circ}\text{C}$ (por imposibilidad física del laboratorio). El apoyo del modelo de simulación ha sido fundamental en esta etapa, puesto que se han realizado simulaciones con el material a $+20^{\circ}\text{C}$ para predecir cuales deben ser las condiciones dinámicas que deben realizarse en los ensayos físicos para producir las mismas cargas que con el material a $+60^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, el contenedor de baterías está diseñado para que no supere los $+50^{\circ}\text{C}$ durante su funcionamiento, por lo tanto, verificar su comportamiento con temperaturas más elevadas se encuentra del lado de la seguridad.

3.2. Resultados ensayos de laboratorio.

Los ensayos de choque reales se realizaron en el Laboratorio de Seguridad Pasiva del INSIA (Instituto de Investigación del Automóvil), perteneciente a la Universidad Politécnica de Madrid. Las pruebas se realizaron con un doble objetivo: por una parte realizar una validación de los modelos matemáticos desarrollados (verificando la calidad de los mismos y si pueden ser utilizados como predictores del comportamiento para futuras configuraciones o diseño); y por otro lado, verificar en condiciones reales las prestaciones de materiales plásticos como elementos estructurales en la fabricación de contenedores de baterías. Como aplicación práctica se realizan los ensayos conforme al reglamento 100 para la categoría N1 (vehículos destinados al transporte de mercancías de hasta 3,5t) que tiene unos requisitos dinámicos más estrictos que para la categoría N2, puesto que los ensayos se realizan a $+20^{\circ}\text{C}$ tal y como indica la normativa.

En total, se realizaron trece ensayos en el laboratorio, ocho de ellos con contenedores inertes (con lastres de reemplazo en acero y aluminio), de acuerdo a la primera fase indicada en la metodología y los cinco restantes haciendo uso de contenedores totalmente funcionales (con los componentes eléctricos y electrónicos originales) destinados a la segunda fase y verificación del reglamento 100 en categoría N1.

La severidad de los ensayos dinámicos estuvo asistida por los modelos de elementos finitos desarrollados. Se seleccionaron diferentes velocidades, aceleraciones y direcciones de impacto con el objetivo de monitorizar distintos grados de carga. Uno de los objetivos principales de los ensayos de choque consistía en la verificación del umbral de fallo del contenedor (monitorizando pequeñas roturas). Generalmente, en ensayos destructivos, el momento de rotura es crítico e inestable, de forma que cuando se inicia la rotura se propaga rápidamente produciendo un fallo catastrófico. Además, también se realizó un ensayo de alta severidad verificando la rotura total del contenedor de baterías. La tabla 2 muestra un resumen de las principales características de la severidad del impacto en los ensayos de la primera fase (contenedor de baterías con balastos de reemplazo de los elementos activos).

Tabla 2: Descripción ensayos realizados con el contenedor de baterías inerte.

ID ENSAYO	DIRECCIÓN DE LA CARGA	DELTA VELOCIDAD (ΔV)	ACELERACIÓN MÁXIMA ALCANZADA
E07	Longitudinal	32 km/h	15g
E08	Longitudinal	42,5 km/h	21g
E09	Longitudinal	54 km/h	29g
E10	Longitudinal	50 km/h	25g
E11	Lateral	27,5 km/h	14g
E14	Vertical	13 km/h	10,5g
E18	Longitudinal	48,8 km/h	23g
E19	Lateral	25 km/h	11g

Para los ensayos con los contenedores totalmente funcionales (segunda fase), se realizaron cinco ensayos, uno para cada dirección diferente de aplicación de la carga. El cambio de velocidad en los ensayos longitudinales (frontal y trasero) de 48,5 km/h (con una aceleración pico de 22g), en los ensayos laterales el cambio de velocidad fue de 24,5 km/h (con una aceleración pico de 11,5g) y finalmente se realizó la verificación de impacto vertical con un cambio de velocidad de 12,5 km/h y pico de aceleración de 10g. Las condiciones de impacto longitudinal y lateral han seguido los requisitos estipulados en el reglamento 100 para la categoría N1. La figura 11 muestra las diferentes configuraciones de los ensayos con contenedor de baterías completamente funcional.

Los resultados de los ensayos fueron satisfactorios, cumpliendo los requisitos del reglamento 100. No se reprodujeron roturas de las carcasas exteriores (aunque se han detectado pequeñas roturas en los elementos interiores). Además, las baterías, electrónica y el sistema de refrigeración han soportado cada uno de los ensayos (sin material de reemplazo) y a la finalización de todos los ensayos el contenedor de baterías se encuentra en estado funcional.

**Figura 11:** Configuración de los ensayos reales realizados en el LSP de la UPM.

4. Conclusiones

Mediante un proceso de diseño iterativo y el análisis por elementos finitos del comportamiento mecánico de un contenedor de baterías, fue posible obtener un producto final con grandes prestaciones de seguridad y un alto grado de integridad estructural frente a eventos de choque. Con la realización de ensayos virtuales de choque, así como de ensayos reales de deceleración en laboratorio, se demostró la capacidad que tiene el contenedor desarrollado dentro del proyecto OPERA4FEV, de soportar las cargas definidas dentro del Reglamento 100 para vehículos de la categoría N1, en condiciones de temperatura de operación de +20°C.

La utilización del material termoplástico reforzado con fibra de vidrio en la fabricación del contenedor ha permitido una reducción en el peso total del conjunto, consiguiendo mejorar la eficiencia energética entre un 10% y un 15% respecto a las soluciones tradicionales.

Gracias a la utilización de los modelos de elementos finitos se han realizado cambios en el diseño que han incrementado en más de cinco veces la capacidad de absorción de energía con un incremento inferior al 2% de la masa total del contenedor de baterías. Además, el diseño de partida estaba realizado en base a la experiencia del fabricante, sin embargo las piezas fabricadas anteriormente por el mismo no tenían tan altos requisitos de resistencia ante choque.

Por último, el análisis del comportamiento mecánico de componentes plásticos mediante ensayos virtuales, permite un proceso de optimización más eficiente y más económico en las etapas de diseño y fabricación de piezas, puesto que las grandes dimensiones del contenedor de baterías implica un coste muy elevado de fabricación de las matrices para la posterior fabricación de los mismos.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financieramente soportado por la Comisión Europea, en el marco del proyecto OPERA4FEV dentro del programa FP7-2011-GC-Almacenamiento electroquímico, con número de contrato SCP1-GA-2011-285671. Parte de esta investigación fue financiada por la Comunidad de Madrid a través del programa SEGVAUTO-TRIES. Seguridad de los vehículos Automóviles, por un Transporte Inteligente, Eficiente y Seguro, con número de contrato S2013/MIT-2713.

6. Referencias

- [1] Thierry Coosemans et al, Lightweight and Integrated Plastic Solutions for Power Battery Racks in Electric Vehicles, In E. Briec, & B. Müller (Eds), Electric Vehicle Batteries: Moving from Research towards Innovation (pp 61-70), Springer International Publishing, (2015). ISBN 978-3-319-12705-7.
- [2] OPERA4FEV Project aims to manufacture electrical vehicle cheaper and lighter by using thermoplastic solutions for battery racks. OPERA4FEV PROJECT – Press release 2011, Sep 29th (<http://www.opera4fev.org>).
- [3] ETSII-UPM. Industriales Research Meeting'16, Universidad Politécnica de Madrid, (2016). ISBN-978-84-16397-31-0.
- [4] Javier Rivera. Análisis del comportamiento mecánico de un rack de baterías frente a eventos de choque. Tesis (Master), E.T.S.I. Industriales (UPM) <http://oa.upm.es/view/institution/Industriales/> (2014)
- [5] United Nations, Regulation No. 100: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train, United Nations agreement (2013).
- [6] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), ST/SG/AC.10/C.3/2010/72: Testing of large lithium batteries and lithium battery assemblies, United Nations (2010).
- [7] Luis Martínez et al. Delivery Van's Battery Rack Design for Crash Safety, in Thermoplastic with Embedded Sort Fiberglass. European Electric Vehicle Congress (EEVC 2015), Bruselas, Bélgica (2014). ISSN-0774-5036.